

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale
VERIFICHE STRUTTURALI DI UN ALBERO DI UN RIDUTTORE
MEDIANTE ANALISI FEM CON SOLIDWORKS SIMULATION

Tutor universitario: Prof. Alberto Campagnolo

Laureando: *Riccardo Bottos*

Padova, 20/07/2026

1

Introduzione al FEM

Richiamare i concetti di base dell'analisi agli elementi finiti

2

Addestramento a SolidWorks Simulation

Analisi statica del telaio piano con elementi trave, puntone e tirante; analisi della piastra forata con studio di sensibilità della mesh

3

Albero intermedio del riduttore – concentrazione delle tensioni

Calcolare il fattore K_t da analisi FEM in tre sezioni critiche e confrontarlo con il manuale di Peterson

4

Albero intermedio del riduttore – deformabilità

Verificare frecce e rotazioni confrontando modello 3D, modello a elementi trave e soluzione analitica della linea elastica

Percorso: richiami teorici sul FEM → addestramento SolidWorks Simulation (telaio piano, piastra forata) → caso applicativo su ll'albero del riduttore

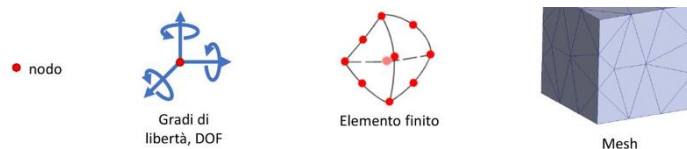
Fasi dell'analisi statica lineare

1. Definizione del corpo, dei vincoli e dei carichi esterni applicati
2. Costruzione della matrice di rigidezza globale del sistema
3. Risoluzione del sistema lineare: calcolo degli spostamenti nodali
4. Calcolo del campo di deformazione dagli spostamenti
5. Calcolo del campo di tensione (legge di Hooke)

Ipotesi dell'analisi statica lineare

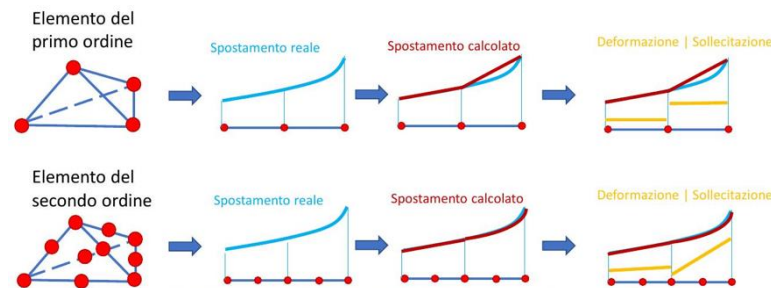
- Carichi costanti nel tempo
- Risposta lineare del materiale
- Piccoli spostamenti

Definizioni di base



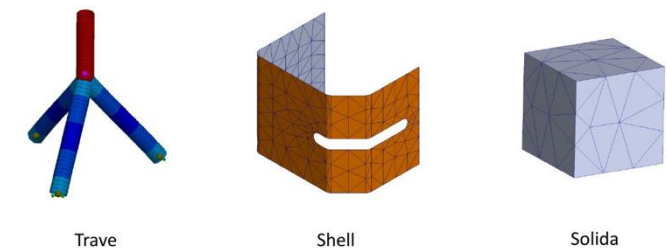
Nodo, DOF, elemento, mesh

Tipi di elemento finito



Elementi 1° e 2° ordine

Tipi di mesh



Trave, shell, solida

Dati

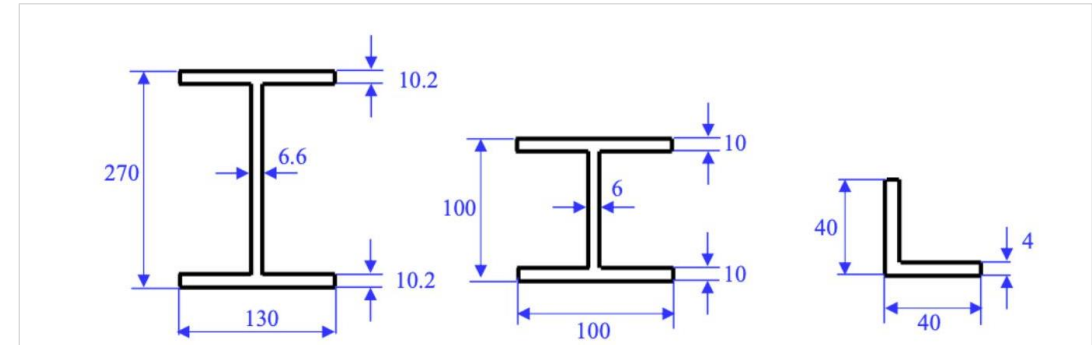
- $F = 60 \text{ kN}$
- $q = 20 \text{ kN/m}$
- $L1 = 6000 \text{ mm}$
- $L2 = 5000 \text{ mm}$

Materiale

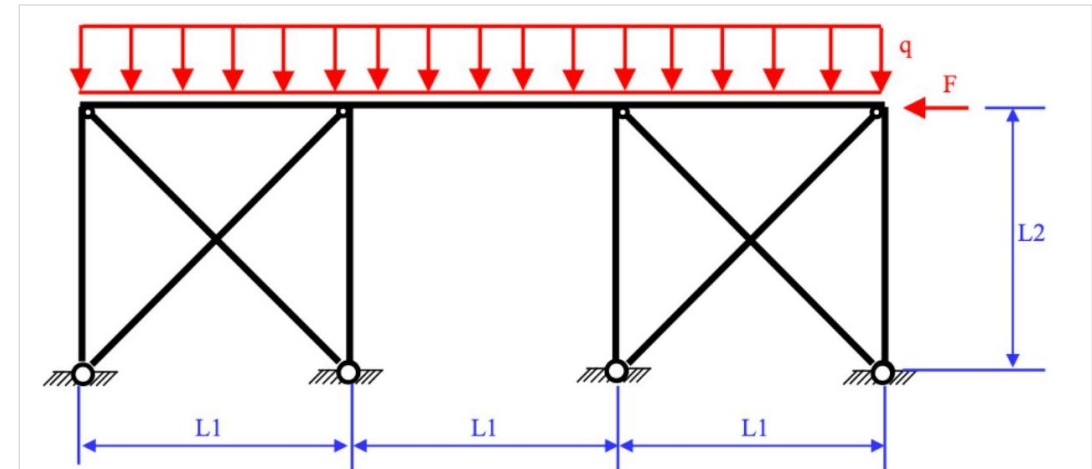
- Acciaio Fe 430
- $\sigma_{adm} = 190 \text{ MPa}$
- $E = 206000 \text{ MPa}$
- $\nu = 0,3$

Obiettivi

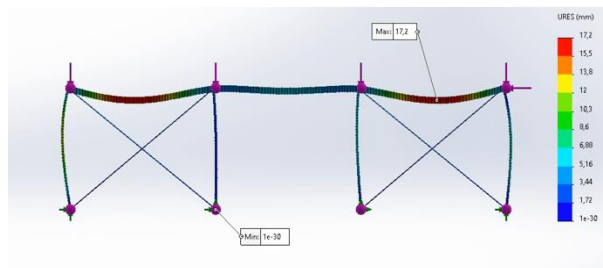
1. Deformata della struttura (spostamenti nodali)
2. Reazioni vincolari
3. Diagrammi di sollecitazione: sforzo normale, taglio e momento flettente



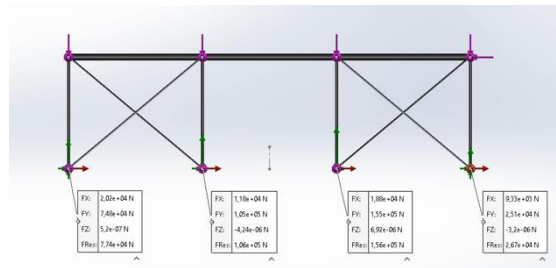
Profili travi



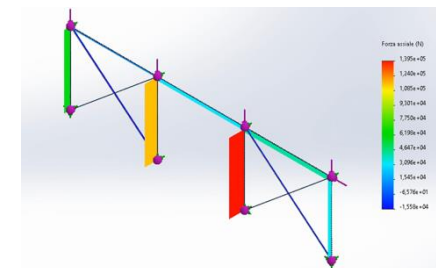
Schema di carico



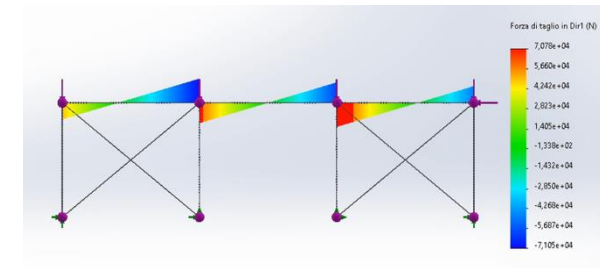
Deformata (URES)



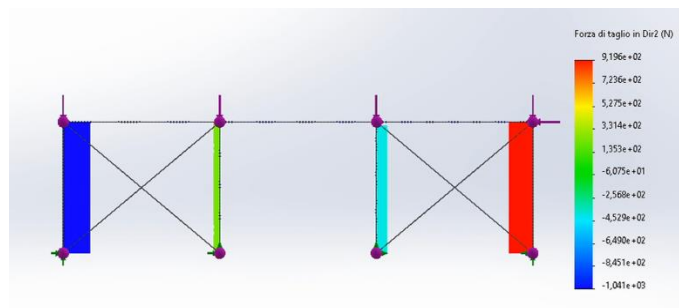
Reazioni vincolari



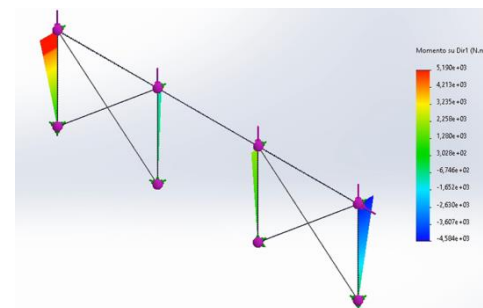
Sforzo normale N



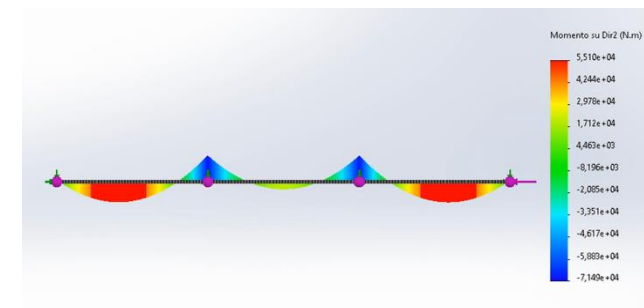
Taglio T1



Taglio T2



Momento M1



Momento M2

Dati

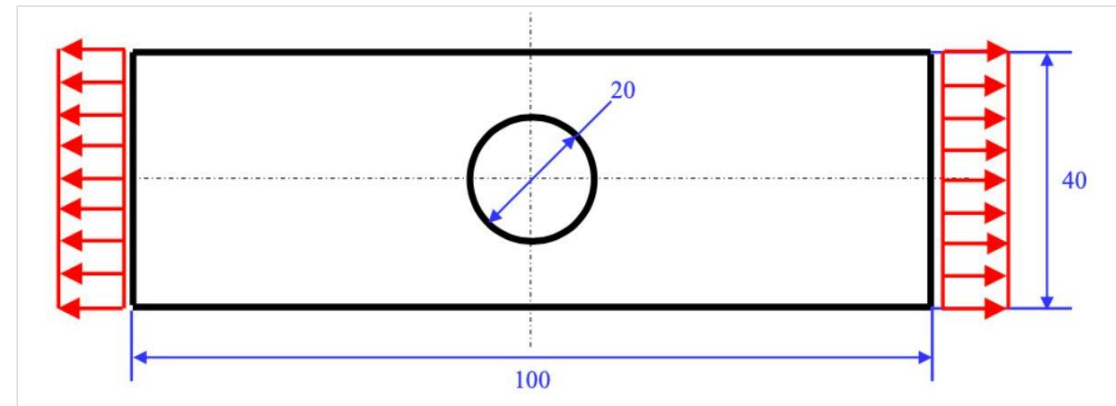
- Spessore piastra = 1 mm
- $\sigma = 1$ MPa

Materiale

- Acciaio Fe 360
- $E = 206000$ MPa
- $\nu = 0,3$

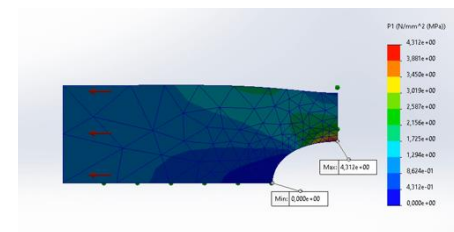
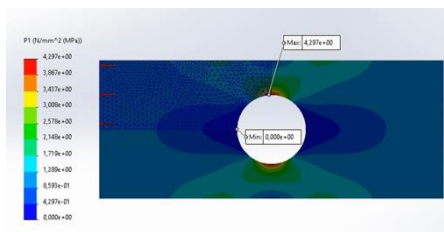
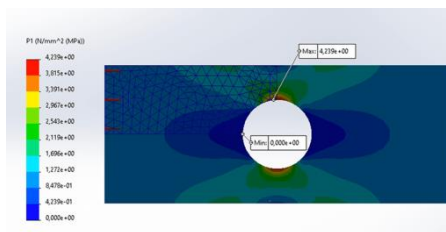
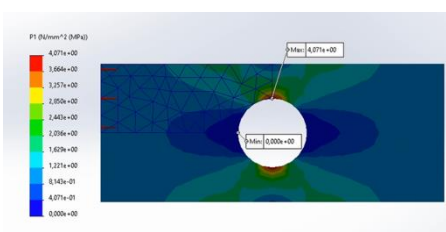
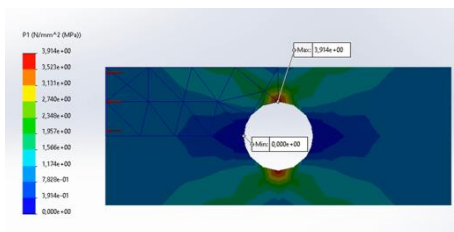
Obiettivi

- Analisi di sensibilità della mesh
- Calcolo del K_{tg} dal grafico
- Confronto con il valore fornito dal manuale di Peterson

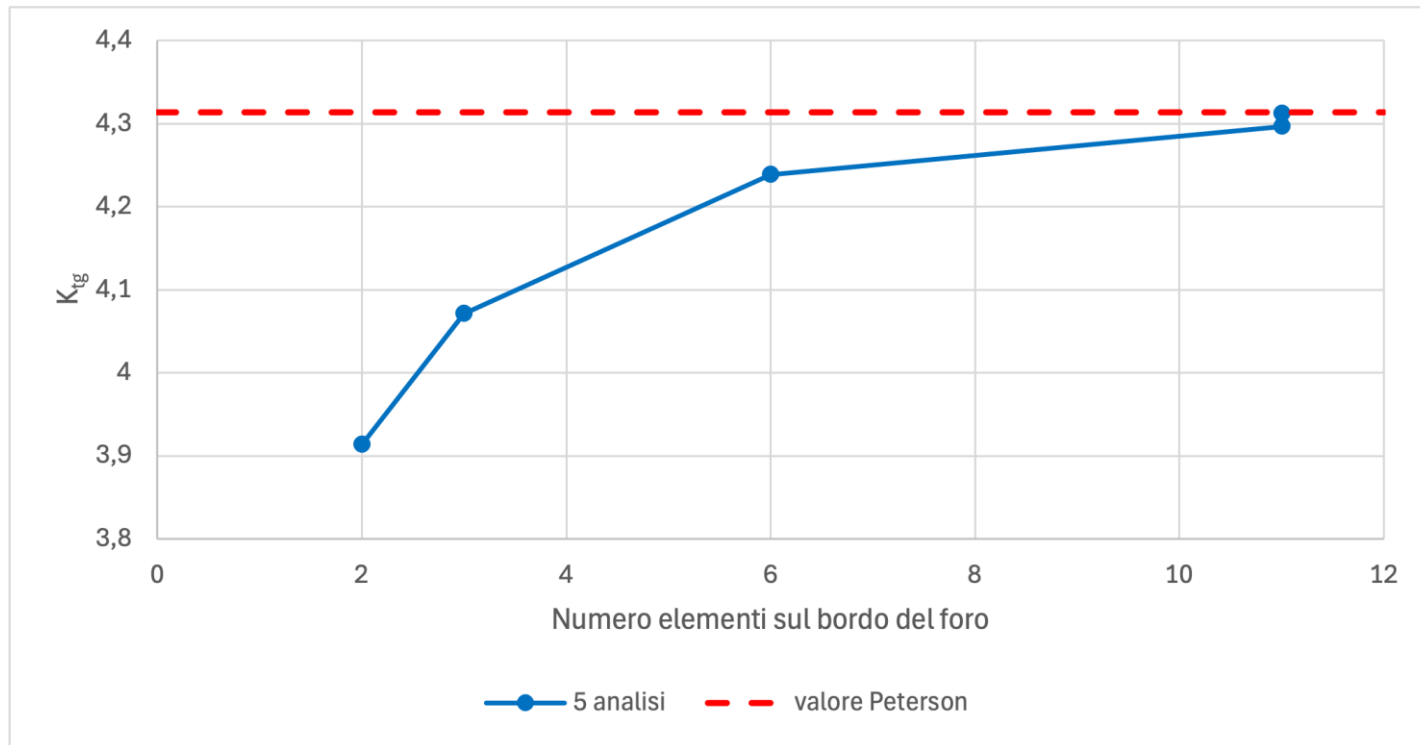


Schema piastra forata

$$K_{tg} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma}$$



Analisi 1→5: raffinamento globale della mesh, poi mirato al bordo del foro



Andamento del K_{tg} al variare del numero di elementi della mesh

Nome	n° elementi bordo foro	K _{tg}	Δ% del Peterson
Analisi 1	2	3,914	9,272
Analisi 2	3	4,071	5,633
Analisi 3	6	4,239	1,739
Analisi 4	11	4,297	0,394
Analisi 5	11	4,312	0,046

Valore Peterson $K_{tg} = 4,314$

Dati

$d = 45 \text{ mm}$ $D = 61 \text{ mm}$ $r = 1 \text{ mm}$ $r/d = 0,022$ $\sigma = 1 \text{ MPa}$

Materiale

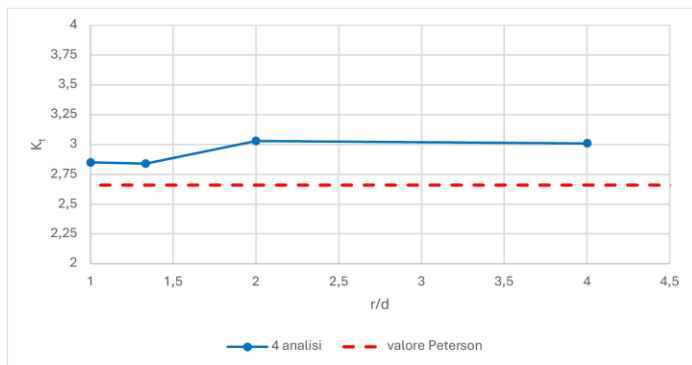
C40 bonificato

$\sigma_r = 590 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 370 \text{ MPa}$ $E = 205000 \text{ MPa}$ $\nu = 0,29$

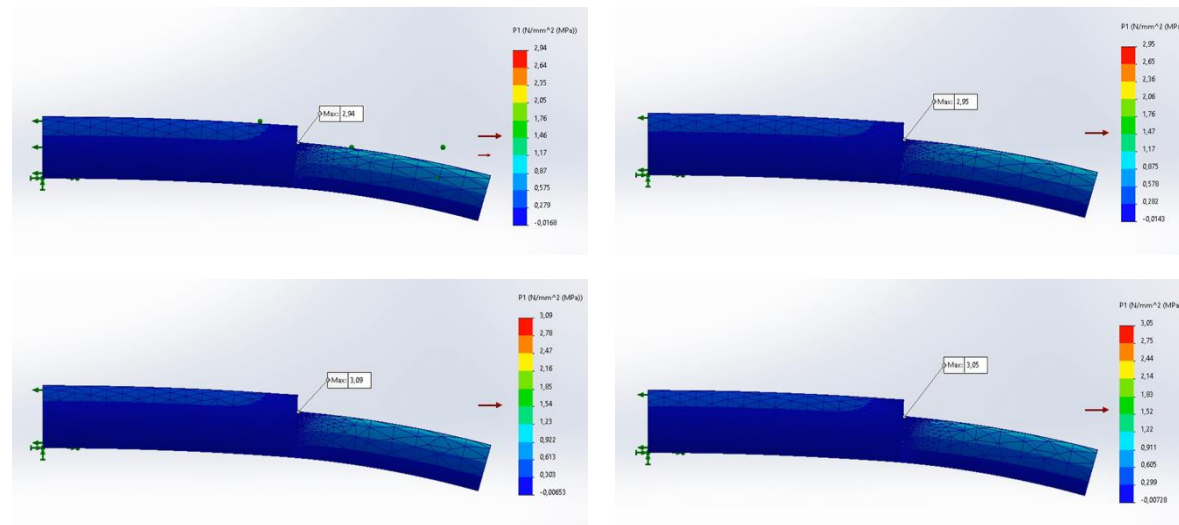
Obiettivi

1. Analisi di sensibilità della mesh
2. Calcolo del K_t dal grafico
3. Confronto con il valore fornito dal Peterson

$$K_t = \frac{\sigma_{pel}}{\sigma_{nn}}$$



Confronto K_t sezione A



N°	l [mm]	r/l	Kt	Δ% dal Peterson
1	1	1	2,85	6,67%
2	0,75	1,3	2,84	6,34%
3	0,5	2	3,03	12,21%
4	0,25	4	3,01	11,63%

Valore Peterson $K_t = 2,66$

Dati

$d = 61 \text{ mm}$ $D = 65 \text{ mm}$ $r = 2 \text{ mm}$ $r/d = 0,033$ $\sigma = 1 \text{ MPa}$

Materiale

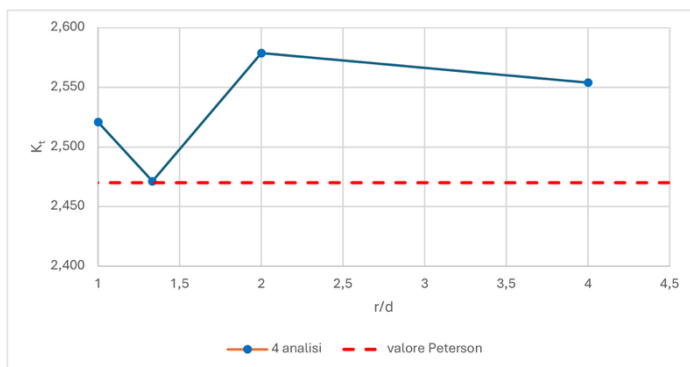
C40 bonificato

$\sigma_r = 590 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 370 \text{ MPa}$ $E = 205000 \text{ MPa}$ $\nu = 0,29$

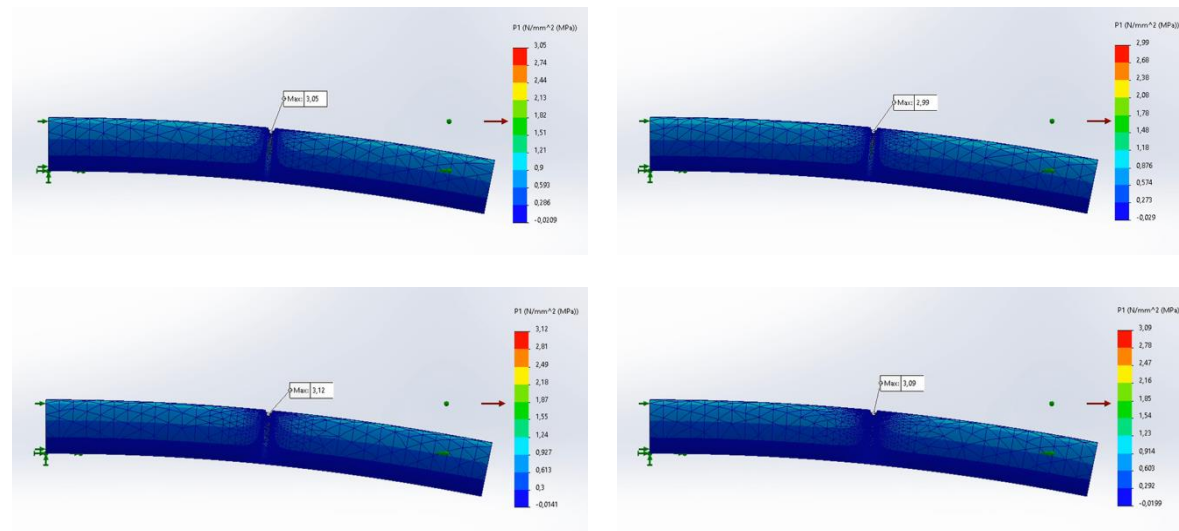
Obiettivi

1. Analisi di sensibilità della mesh
2. Calcolo del K_t dal grafico
3. Confronto con il valore fornito dal Peterson

$$K_{tn} = K_{tg} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3$$



Confronto K_t sezione B



N°	l [mm]	r/l	Ktg	Ktn	Δ% dal Peterson
1	2	1	3,05	2,52	2,01%
2	1,5	1,3	2,99	2,47	0,05%
3	1	2	3,12	2,58	4,22%
4	0,5	4	3,09	2,55	3,29%

Valore Peterson $K_{tn} = 2,47$

Dati

$d = 65 \text{ mm}$ $D = 80 \text{ mm}$ $r = 3 \text{ mm}$ $r/d = 0,046$ $\sigma = 1 \text{ MPa}$

Materiale

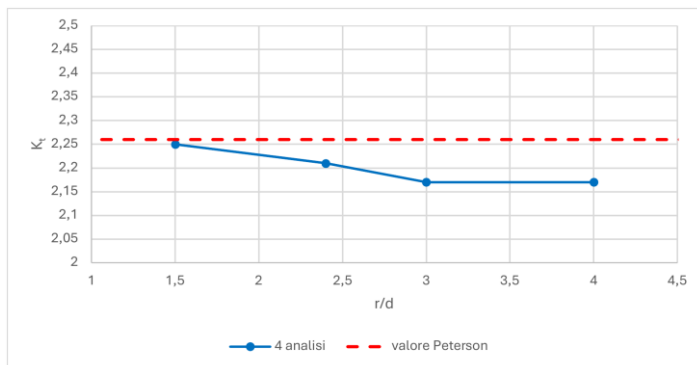
C40 bonificato

$\sigma_r = 590 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 370 \text{ MPa}$ $E = 205000 \text{ MPa}$ $\nu = 0,29$

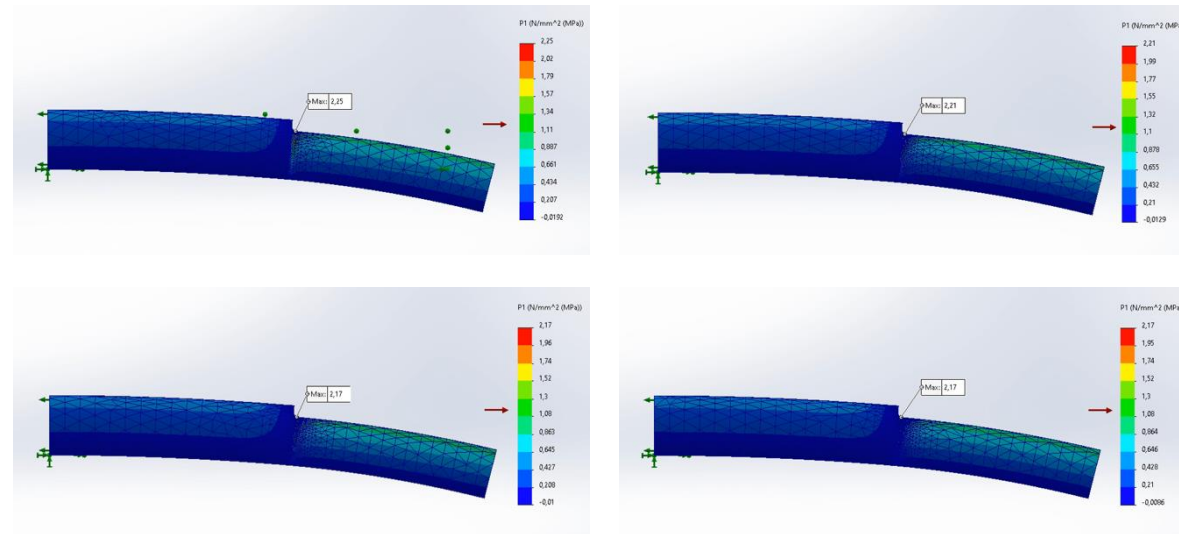
Obiettivi

1. Analisi di sensibilità della mesh
2. Calcolo del K_t dal grafico
3. Confronto con il valore fornito dal Peterson

$$K_t = \frac{\sigma_{pel}}{\sigma_{nn}}$$



Confronto K_t sezione D



N°	l [mm]	r/l	K_t	$\Delta\%$ dal Peterson
1	2	1,5	2,25	0,44%
2	1,25	2,4	2,21	2,21%
3	1	3	2,17	3,98%
4	0,75	4	2,17	3,98%

Valore Peterson $K_t = 2,26$

Dati

- $F_{r2} = 1021,50 \text{ N}$
- $F_{t2} = 2806,50 \text{ N}$
- $F_{r3} = 3543,13 \text{ N}$
- $F_{t3} = 9740,18 \text{ N}$

$$f(x) = \frac{1}{6} \frac{F}{EJ} \frac{a^2 b^2}{L} \left(\frac{2x}{a} + \frac{x}{b} + \frac{x^3}{a^2 b} \right) \text{ da S a C}$$

$$f(x') = \frac{1}{6} \frac{F}{EJ} \frac{a^2 b^2}{L} \left(\frac{2x'}{a} + \frac{x'}{b} + \frac{x'^3}{b^2 a} \right) \text{ da D a C}$$

Rotazione cuscinetto sinistro

$$\varphi_s = \frac{Fb(l^2 - b^2)}{6EJl}$$

Rotazione cuscinetto destro

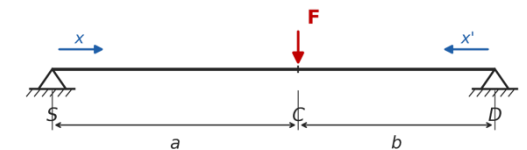
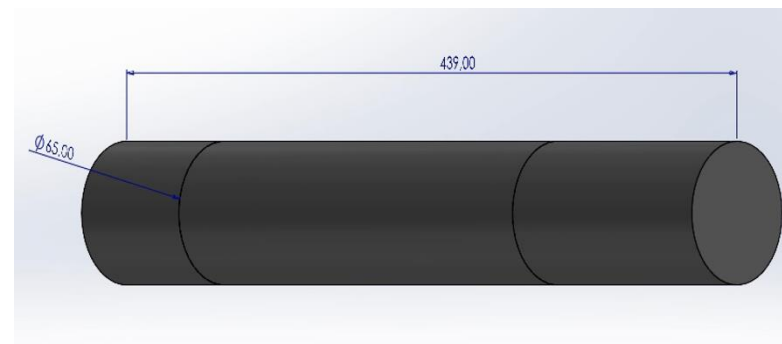
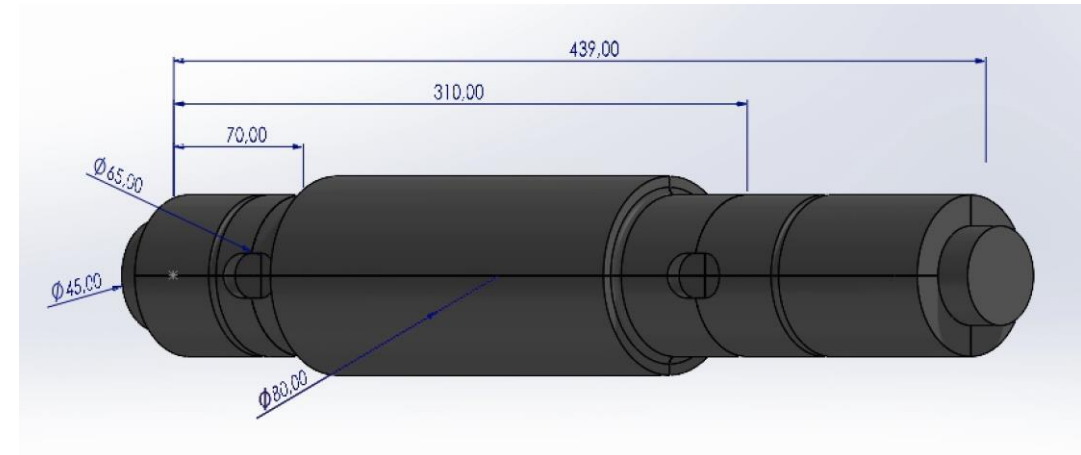
$$\varphi_d = \frac{Fb(l^2 - a^2)}{6EJl}$$

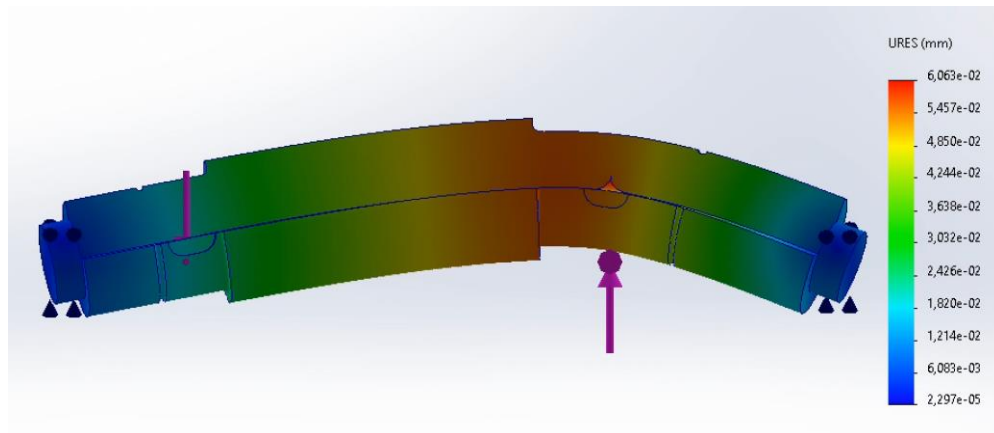
Materiale

- C40 bonificato
- $\sigma_r = 590 \text{ MPa}$
- $\sigma_s = 370 \text{ MPa}$
- $E = 205000 \text{ MPa}$
- $\nu = 0,29$

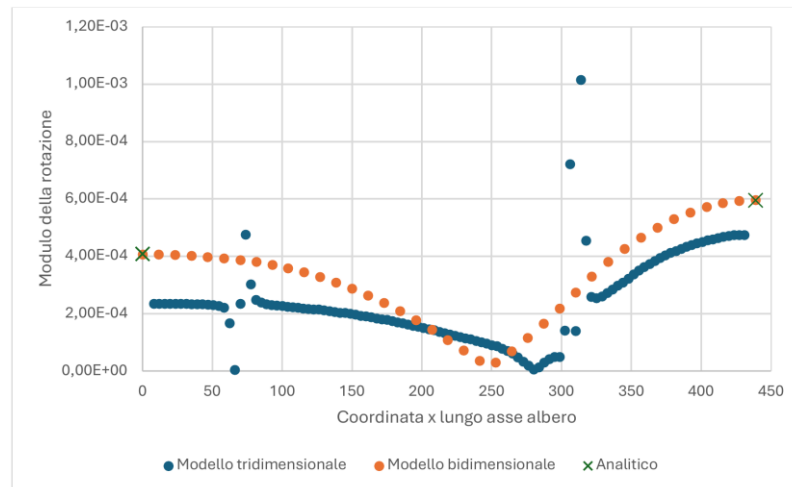
Obiettivi

1. Calcolo di spostamenti e rotazioni utilizzando un modello solido tridimensionale
2. Calcolo di spostamenti e rotazioni utilizzando un modello monodimensionale
3. Confronto dei risultati ottenuti con quelli trovati analiticamente

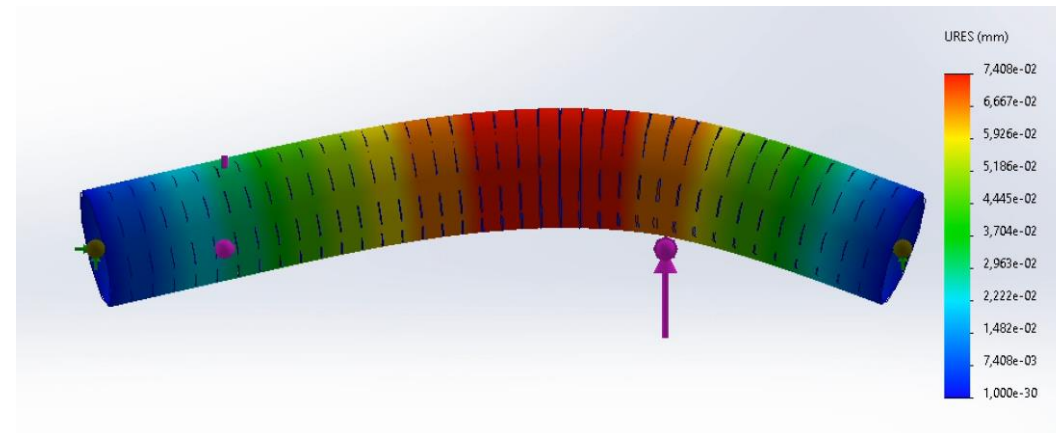




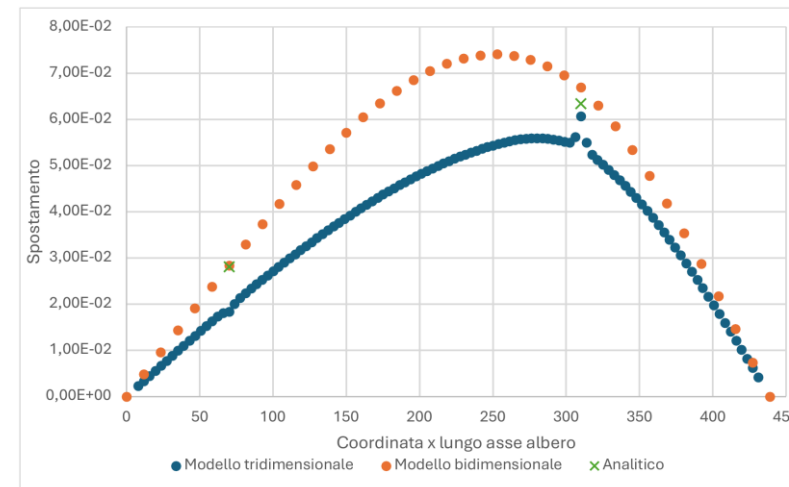
Deformata dell'albero — modello tridimensionale



Andamento della rotazione lungo l'asse dell'albero



Deformata dell'albero — modello monodimensionale



Andamento dello spostamento lungo l'asse dell'albero

- 1 Sviluppata e validata una metodologia di analisi FEM con SolidWorks Simulation, incluso lo studio di sensibilità della mesh, su casi di complessità sempre maggiore.
- 2 K_t calcolati per le 3 sezioni critiche dell'albero del riduttore sono coerenti con la teoria dell'intaglio e con il manuale del Peterson, costituiscono un dato affidabile per le verifiche.
- 3 Deformabilità: il modello a elementi trave fornisce frecce e rotazioni a favore di sicurezza e coerenti con la soluzione analitica, con un costo computazionale nettamente inferiore al modello solido.

Grazie per l'attenzione